

Microdistribución de Boro y Litio en los materiales del complejo anatéctico de la Peña Negra (Batolito de Avila), mediante la técnica de imágenes producidas por partículas α

MARIA DOLORES PEREIRA ¹ y DENIS MARTIN SHAW ²

¹ Departamento de Geología. Ftad. de Ciencias, Universidad de Salamanca .37008 Salamanca, ESPAÑA

² McMaster University. Dept. of Geology. Hamilton. Ontario, L8S 4M1 CANADA

Resumen: Debido a la importancia que tiene el boro en el comportamiento de un sistema granítico durante su cristalización, han sido llevados a cabo diversos experimentos para estudiar la distribución de dicho elemento en los minerales esenciales que forman parte de los materiales del complejo anatéctico de la Peña Negra. La aplicación de la técnica analítica cualitativa de imágenes producidas por partículas radiactivas (α -track images) ha demostrado ser una herramienta útil en el estudio de la distribución modal del boro en los minerales. Sin embargo, las interferencias con las imágenes producidas por el contenido en litio de esos mismos minerales pueden llevar a interpretaciones erróneas si dicha técnica analítica no se realiza en combinación con técnicas cuantitativas que avancen el conocimiento de qué minerales pueden ser portadores de boro y litio en los materiales con la asociación mineral estudiada.

Palabras clave: Boro, complejo anatéctico de la Peña Negra, litio, imágenes producidas por partículas radiactivas (α -track images)

Abstract: Due to the importance of boron in the crystallization behavior of granitic systems, several experiments have been carried out to study the distribution of such element in the main minerals from the Peña Negra Anatectic Complex. The application of particle-track technique (α -track images) has demonstrated that this is a suitable tool for the study of the B-bearing minerals modal distribution. However, interferences with tracks produced by the lithium content on the same minerals can lead to a misinterpretation if this technique is not combined with quantitative methods supporting a knowledge of which minerals can accumulate boron from the materials with the studied mineral association.

Key words: Boron, Peña Negra Anatectic Complex, lithium, α -track images

Pereira, M.D. y Shaw, D.M.- Microdistribución de boro y litio en los materiales del complejo anatéctico de la Peña Negra (Batolito de Avila), mediante la técnica de imágenes producidas por partículas α . *Rev. Soc. Geol. España*, 7 (3-4): 311-317.

El estudio de la geoquímica del boro en rocas ígneas y ultrametamórficas es de gran consideración, puesto que los componentes volátiles varían con las diferentes condiciones de temperatura y deshidratación durante el metamorfismo. Han sido realizados diversos estudios en sistemas enriquecidos en boro para definir los efectos de este elemento, así como elementos asociados a él a modo de trazas (e.g., F y P) en fases sólidas y líquidas (Chorlton y Martin, 1978; Manning, 1981; Pichavant, 1981, 1987; London *et al.*, 1990; Holtz *et al.*, 1993). Los niveles de concentración en boro de rocas graníticas son diversos. Mientras que algunas áreas estudiadas contienen varios cientos de ppm de B, e incluso elevado porcentaje de este elemento se acumula en rocas pegmatíticas y zonas metasomáticas (Shearer y Papike, 1986; Shearer *et al.*, 1984), otros granitoides están empobrecidos en boro.

No siempre es fácil obtener buena información sobre el contenido en boro en este tipo de rocas, debido a la dificultad en la determinación de este elemento a bajas concentraciones.

El protolito de las migmatitas que conforman el Complejo Anatéctico de la Peña Negra (CAPN) estuvo sometido a condiciones de baja presión durante un proceso anatéctico durante la Orogenia hercínica, que produjo granitos, granodioritas y material restítico (Pereira, 1989; Bea y Pereira, 1990; Pereira, 1992; Pereira *et al.*, en preparación). En principio, el propósito de este trabajo fue discutir únicamente la distribución del boro en los minerales de los materiales de este complejo, mediante la aplicación de la técnica analítica cualitativa de imágenes producidas por partículas radiactivas α (α -track images). Sin embargo, como se discutirá a continuación, es

prácticamente imposible distinguir entre la concentración de boro y la de litio mediante esta técnica.

Características de las muestras estudiadas

Las muestras estudiadas pertenecen a los principales litotipos encontrados en el Complejo anatético de la Peña Negra (CAPN) (ver descripción completa en Bea y Pereira, 1990 y Pereira, 1992) que está formado por rocas metamórficas de grado medio-alto (migmatitas en su mayor parte) y por diversos tipos de segregados graníticos generados a partir de las primeras durante la anatexis hercínica.

Las migmatitas tienen una mineralogía poco variable, estando compuestas por una paragénesis característica de condiciones de baja presión: cuarzo + plagioclasa + feldespato potásico + biotita + cordierita \pm sillimanita como minerales esenciales, e ilmenita, apatito, circón, piritita, calcopiritita y turmalina como minerales accesorios. Los segregados graníticos (granitos y granodioritas) tienen prácticamente la misma mineralogía que las migmatitas (Pereira, 1992). Las restitas están formadas principalmente por sillimanita y biotita, con cordierita y cuarzo en cantidades variables y con ilmenita como accesorio.

Después de analizar cuantitativamente el contenido en boro de roca total en muestras pertenecientes a los distintos materiales, mediante activación neutrónica (Pereira y Shaw, en preparación), se observó que este elemento se presenta en bajas concentraciones (del orden de menos de 20 ppm) en la mayor parte de las muestras estudiadas. A partir de este estudio se seleccionaron seis muestras, representando diferentes litotipos: una migmatita, una restita, un leucogranito cordierítico, una muestra de migmatita fuertemente afectada por una cizalla, una muestra de leucosome y otra de melanosome, pertenecientes estas dos últimas a una migmatita de facies schlieren (Bea y Pereira, 1990; Pereira, 1992). En todas estas muestras, el mineral máfico característico es la cordierita, que se presenta con textura típicamente magmática (Pereira y Bea, 1994), frecuentemente rodeada por una aureola de alteración, constituida casi exclusivamente por clorita.

Metodología de trabajo

Los análisis por microsonda electrónica de elementos mayores en los minerales esenciales se realizaron utilizando las microsondas electrónicas CAMEBAX de las universidades de Oviedo y Hannover (Alemania). Los análisis de elementos traza en cristales individuales en láminas delgadas ($\approx 80 \mu\text{m}$) fueron realizados con un sistema de ablación laser Perkin Elmer modelo 302, acoplado a un espectrómetro PE SCIEX ICP-MS Elan-5000. Los datos de elementos mayores y trazas (Bea *et al.*, 1994) se utilizaron para comprobar la existencia de algún tipo de correlación entre estos elementos y la concentración de boro (Pereira y Shaw, en preparación).

El análisis de boro en roca total se realizó mediante activación neutrónica (Prompt Gamma Neutron Activa-

tion Analysis) en el reactor nuclear de McMaster University. Se encapsularon 0,5 g de cada muestra en polvo en viales de teflón y se irradiaron en el reactor con un flujo de neutrones de $6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El periodo de irradiación fue de 10^3 s. Simultáneamente se determinó la intensidad del pico producido en el detector correspondiente a la longitud de onda 478 keV (prompt gamma-ray peak), perteneciente al boro, resultante a partir de las reacciones: $^{10}\text{B} + n = ^7\text{Li}^* + ^4\text{He}$ y $^7\text{Li}^* = ^7\text{Li} + \alpha$ (Truscott y Shaw, 1984). El límite de detección es del orden de 0,3 ppm. Detalles sobre este método están descritos en Higgins *et al.*, 1984 y Shaw y Smith, 1991.

El análisis de litio en las rocas se llevó a cabo en un espectrómetro ICP-MS, después de la digestión de 0,1 g de muestra en polvo en una solución compuesta por $\text{NO}_3\text{H} + \text{FH}$, en un vaso de teflón a alta presión y temperatura. Posteriormente, la muestra se llevó a sequedad con posterior disolución en NO_3H al 4 %. Se utilizó un espectrómetro PE SCIEX ELAN-5000. La precisión fue de $\pm 2\%$.

Para realizar los mapas de partículas radiactivas α (α -track images: ATI) se utilizó el Reactor Nuclear de McMaster University, con un cañón de neutrones con un flujo de $10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, con un tiempo de irradiación de 12 minutos. El método está basado en el proceso que tiene lugar al producirse la reacción nuclear $^{10}\text{B} + n = ^7\text{Li} + ^4\text{He}$. Más información sobre este método puede encontrarse en Shaw *et al.* (1988) y en referencias allí citadas.

Explicación de la técnica

Para aplicar la técnica cualitativa de ATI, se utilizó una lámina delgada de la roca, pulida y sin cubrir. Como detector se utiliza preferentemente una película de nitrato de celulosa (en la realización de este trabajo se utilizó Kodak CN-85, tal como recomiendan por Fleischer *et al.*, 1975 y Truscott y Shaw, 1984). La película tiene que tener el mismo tamaño que la lámina delgada, sobre la que se pone en contacto directo. Sobre el detector se aplica una lámina de polietileno, también del mismo tamaño, como absorbente de partículas que pudiesen interferir con las partículas α . Se pueden agrupar las láminas en grupos de un máximo de cuatro, para irradiar juntas, todas ellas envueltas en polietileno (Truscott, 1980).

La irradiación se lleva a cabo en el núcleo del reactor, durante 12 minutos y posteriormente se dejan "enfriar" durante una semana para evitar posibles riesgos de radiactividad. Las partículas α producidas por la reacción $^{10}\text{B} + n = ^7\text{Li} + ^4\text{He}$ que tiene lugar durante el proceso de irradiación, impactan en la película de nitrato de celulosa, produciendo unas indentaciones de forma cónica de aproximadamente 1μ de profundidad. Estas indentaciones pueden hacerse visibles mediante un proceso de revelado, en una solución (2,5 N) consistente en 25 g de NaOH en 250 ml de agua destilada, que se calienta a unos 50 °C. El detector se introduce en esta solución durante unos 15 minutos o hasta que la imagen comience a aparecer clara. En este momento, la película se retira de la solución y se lava repetidamente en agua destilada pa-

ra detener el proceso. El revelado afecta exclusivamente a las áreas dañadas por las partículas α , y la imagen puede observarse perfectamente una vez que el detector está seco, utilizando un microscopio. A simple vista, la intensidad de la imagen es proporcional a la concentración en boro de los minerales. Una vez obtenidas las imágenes en el detector, éste se fotografía. En los negativos de las fotografías, las zonas afectadas por las partículas α aparecen oscuras. Son las zonas de alta concentración en boro: cuanto más oscura es la imagen, mayor es la concentración en este elemento.

Existe un problema en la determinación cualitativa de boro por el método ATI, y es que el litio también genera el mismo tipo de marcas al ser la muestra irradiada, al producirse la reacción ${}^6\text{Li} + n = {}^3\text{H} + {}^4\text{He}$ (Shaw *et al.*, 1988). La captura de neutrones por ambos elementos es distinta, siendo más efectiva en el caso del boro. Además, bajo las proporciones isotópicas en que se encuentran estos dos elementos en las rocas terrestres, el boro genera unas marcas más potentes (de 10 a 15 veces más) que el litio. Sin embargo, no siempre es posible determinar si los impactos producidos por las partículas α se deben al contenido en boro o en litio del mineral. Por tanto, esta técnica no es muy precisa en cuando a la distinción de la distribución de ambos elementos dentro de los minerales de la lámina estudiada, y es preciso además tener en cuenta la posibilidad de que determinados minerales acumulen uno u otro elemento.

Existen otros elementos generadores de imágenes ATI (e.g., oxígeno) en pequeña proporción. Pero en el caso del presente trabajo no hay problema de interferencia con ellos, debido a que se utilizó un periodo de irradiación muy corto.

Distribución de boro y litio en minerales de la Peña Negra

En general, una roca puede incorporar boro y litio de los siguientes modos: 1) como inclusiones fluidas en los minerales (Roedder, 1984; London *et al.*, 1987); 2) incluido en algunos minerales durante la cristalización magmática, dando lugar a una fase enriquecida en este elemento (Malinko *et al.*, 1979); 3) como un sustituyente isomorfo de otros elementos: Si^{4+} y Al^{IV} en el caso del boro, y B^{3+} y Mg^{2+} en el caso del litio; y 4) heredado de otras fases enriquecidas e incorporado en capas intergranulares a través de las aguas meteóricas (Sauerer *et al.*, 1989; Pereira y Shaw, en preparación).

La concentración de boro y litio dentro de los minerales se estudia para examinar de un modo cualitativo si existe una distribución preferencial de estos elementos por alguna de las fases. El análisis de separados minerales no da lugar a interpretaciones correctas debido a la inclusión de minerales accesorios dentro de los minerales que puedan ser portadores de boro o litio (Bea *et al.*, 1994). Armbruster y Irouschek (1983) analizaron cordieritas a partir de separados minerales, por medio de absorción atómica; se aseguraron de que los ejemplares analizados fueran lo más frescos posible, para evitar proble-

mas de pinitización. Observaron que los contenidos en Li en la cordierita podían llegar a ser muy elevados, del orden de 100-450 ppm, y que este valor no se debía a la presencia de cloritas, pues por comparación con ejemplares más pinitizados, éstos presentaban valores más bajos en Li que las cordieritas que se suponía más frescas. El Li^+ en estas cordieritas debe de estar substituyendo al Mg^{2+} (Armbruster y Irouschek, 1983), aunque el papel del Li en este mineral aún no está claro.

La sillimanita es el único mineral que puede incorporar boro en la red dentro de un sistema donde haya un enriquecimiento en este elemento (Grew y Hinthorne, 1983), siempre que no haya una fase donde este elemento se coordine preferentemente (e.g., turmalina, cornerupina, zafirina). El boro parece estar substituyendo a parte del Si en la red de la sillimanita (Grew y Rossman, 1985) de manera que $(\text{Si} + \text{B}) = 1$. Además, se sabe que el contenido en boro de la sillimanita aumenta con el grado de metamorfismo (Grew y Hinthorne, 1983). Sin embargo, este mineral apenas contiene litio, a pesar de que en ocasiones se hayan citado importantes cantidades de este elemento (Pearson y Shaw, 1960), probablemente debido a que el análisis se hizo sobre concentrados minerales, que presenta el problema de que la sillimanita va frecuentemente asociada a la moscovita, la cual contiene cantidades significativas de Li.

La figura que acompaña este trabajo da una idea de la aplicación de la técnica ATI al análisis modal de una determinada roca. A partir de las imágenes obtenidas se puede hacer una justificación del contenido en boro y litio de la roca total (Pereira y Shaw, en preparación). Las restitas del CAPN son las rocas que individualmente contienen mayor contenido en boro (≈ 50 ppm) y en litio (≈ 150) (Tabla 1); al mismo tiempo, son estas rocas las

Tabla 1.- Concentración de Boro y Litio (ppm) en roca total de los litotipos característicos del Complejo Anatectico de la Peña Negra

Litotipo	B*	máx-mín	Li*	máx-mín
Migmatita	20	124 - 4	65	138 - 39
Leucogranito	15	47 - 4	39	118 - 15
Restita	45	104 - 9	152	181 - 135

* Valor medio

que presentan una imagen más oscura después de obtener el negativo de la imagen ATI (Pereira y Shaw, en preparación). En contraste, los leucogranitos cordieríticos son los materiales más empobrecidos en boro y litio (Tabla 1), y la imagen ATI aparecerá bastante más clara, a no ser por los puntos específicos donde se localice la cordierita, que se mostrarán fuertemente sensibilizados a la radiación.

Para realizar el estudio de la distribución de boro y litio en los minerales de la Peña Negra, hemos tenido en cuenta los valores de concentración de estos elementos en diversos minerales metapelíticos (Grew y Hinthorne, 1983; Jones y Smith, 1984; Shearer y Papike, 1986; Hervig y Peacock, 1989; Grew *et al.*, 1990; Bebout *et al.*, 1992).

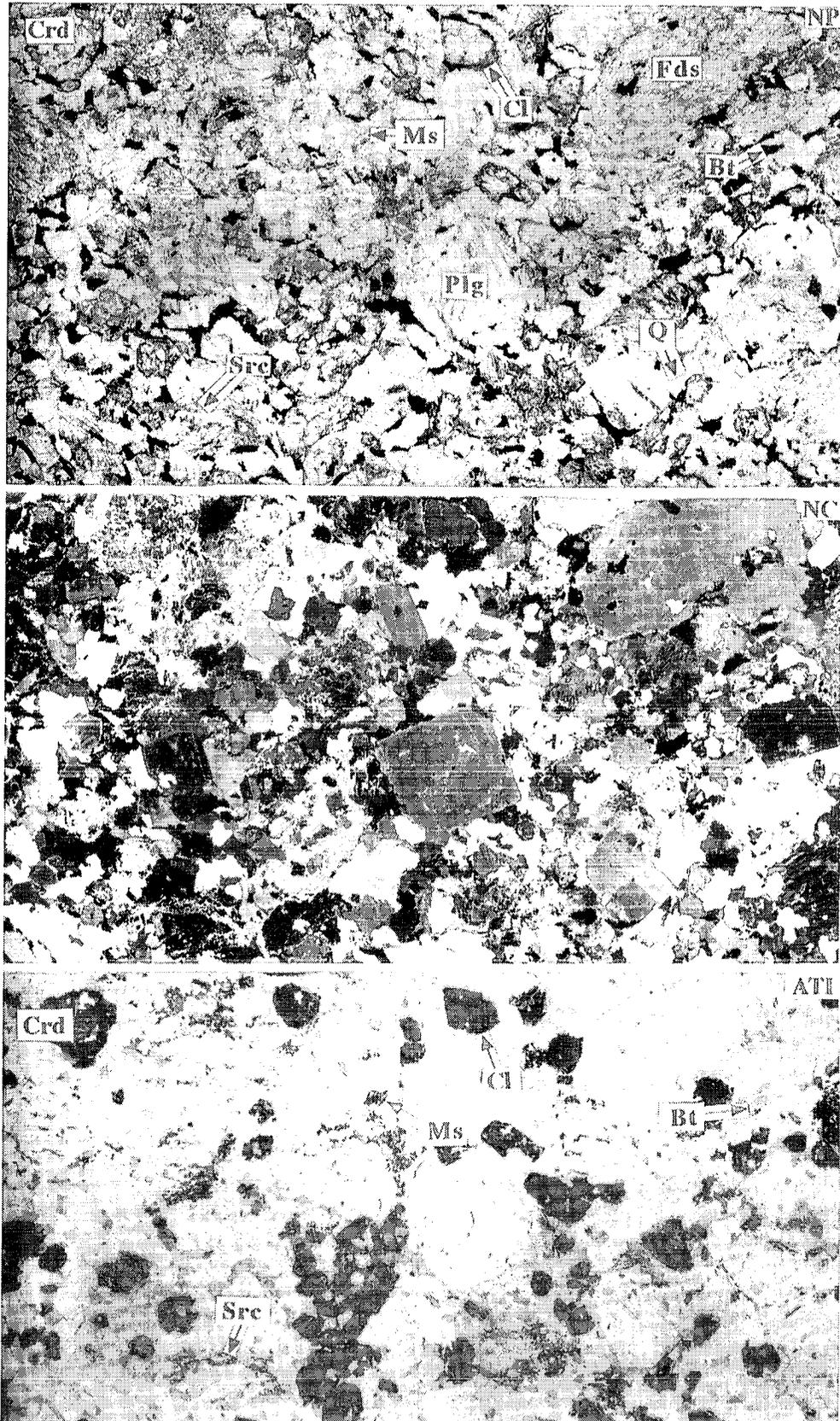


Figura 1.- Muestra de leucosome de migmatita del Complejo Anatóctico de la Peña Negra. Comparación de lámina delgada (NP: nícoles Paralelos; NC: nícoles Cruzados) con la imagen producida por partículas α (ATI). La imagen más oscura en ATI es la producida por la clorita (Cl) procedente de la alteración de la cordierita (Crd), la sericita (Src) procedente de la alteración del feldespato potásico (Fds), y los cristales de moscovita (Ms). La cordierita genera una imagen bastante intensa, aunque menos que los minerales anteriores; dentro de ella se destacan las inclusiones de cuarzo (Q) y opacos, que no dan lugar a ningún tipo de imagen. La biotita (Bt) es el mineral máfico que más tenue imagen ofrece, aunque destaca por comparación con los que no sugieren ninguna respuesta a las partículas α tales como feldespato potásico, plagioclasa (Plg) y cuarzo. El campo de visión es 3,5 x 2 cm.

Debido a que en las rocas del CAPN apenas existen minerales enriquecidos en boro (e.g., turmalina), se asume que este elemento está acumulado en su totalidad en las fases principales que componen estas rocas. Se ha observado que, en general, los aluminosilicatos presentes en la roca son los que presentan mayor sensibilidad a la irradiación por partículas α . En principio sería indicativo de un mayor contenido en boro de estos minerales. Esto sería lógico si se tiene en cuenta que el B tiene el mismo comportamiento que el Al (Chaussidon y Libourel, 1993), con lo que los minerales que concentren Al también concentrarían B. Existe la excepción de los feldespatos, que no contienen apenas boro (ni litio ya que no generan ningún tipo de imagen). A pesar de que Sauerer *et al.*, (1989) observan un alto contenido de boro en feldespatos, no parece que esto sea un hecho común (Malinko *et al.*, 1979), a no ser que dichos feldespatos estén sericitizados. Por tanto, en principio pensamos que el boro se encontraría en los materiales de la Peña Negra substituyendo al Al en aluminosilicatos, pero como veremos más adelante, el comportamiento del boro en los minerales del CAPN es otro diferente.

En las imágenes obtenidas para este trabajo (Fig. 1) se observan los hechos siguientes:

1) La imagen más oscura siempre corresponde a la moscovita, sericita y clorita procedente de la alteración de la cordierita. La moscovita puede tener un contenido variable en boro y litio (Harder, 1969; Bebout *et al.*, 1992), mientras que la clorita concentra hasta unos 50 ppm (Harder, 1969).

2) Es la propia cordierita la que ofrece una mayor densidad en el área dañada por las partículas radiactivas. El alto contenido en Li de las cordieritas del CAPN (Bea *et al.*, 1994) hace pensar que la imagen obtenida por ATI se debe precisamente a la interferencia con este elemento y no al contenido en B, cuya concentración es sumamente baja (Tabla 2). Así mismo, los valores de boro en cordieritas citados en la bibliografía son siempre bajos (máximo ≈ 30 ppm, Grew *et al.*, 1990). Se sabe que las cordieritas de rocas metamórficas de facies anfibolita pueden llegar a contener elevadas cantidades de Li, superior a las de las cordieritas de rocas de más elevado grado metamórfico (Armbruster y Irouschek, 1983; Grew *et al.*, 1990). Además, las cordieritas con más alto contenido en cationes canal, concretamente en Na^+ , como es el caso de las cordieritas de la Peña Negra (Pereira, 1992) están también más enriquecidas en Li (Grew *et al.*, 1990) (Tabla 2). Por tanto la imagen que den las cordieritas mediante ATI es más seguro que se deba al contenido en litio y no en boro como al principio se pensó. La imagen que presentan las cordieritas varía en intensidad, dependiendo de que se trate de cordieritas frescas o fuertemente pinitizadas (Pereira y Shaw, en preparación).

3) Cuando existe sillimanita en la muestra, este mineral produce una imagen bastante intensa en el detector, comparable a la que produce la moscovita (Pereira y

Tabla 2.- Concentración de Boro y Litio (ppm) en minerales.

La cordierita y la biotita pertenecen a muestras de migmatitas del Complejo Anatectico de la Peña Negra (Bea *et al.*, *in litt.*). Los datos de la sillimanita pertenecen a Grew y Hinthorne (1983)

Mineral	B*	mín-máx	Li*	mín-máx
Cordierita	5	3 - 8	441	361 - 469
Biotita	5	1 - 14	151	110 - 206
Sillimanita	932	109 - 1335	b.l.d.	

*: Valor medio

b.l.d.: Bajo límite de detección

Shaw, en preparación). Las sillimanitas de las muestras del CAPN son ligeramente no estequiométricas (Pereira, 1992). En principio, el déficit de Al observado en este mineral se explicó por un elevado contenido en Ti y Fe que la sillimanita presenta ocasionalmente (Kerrick, 1990). Parece que, además, parte de Si está sustituido por B (Grew y Rossman, 1985). Por esto la imagen obtenida en las imágenes ATI de la sillimanita de las muestras del CAPN deberá corresponder al contenido en boro de este mineral.

4) Las biotitas dan lugar a una imagen significativa (Fig. 1), no siendo tan oscura como la correspondiente a las fases anteriores pero suficiente como para pensar que este mineral tiene un contenido considerable de los elementos estudiados en este trabajo. La biotita no contiene una alta concentración de boro o litio (Jones y Smith, 1984), aunque sí lo suficiente como para ser reconocida en las imágenes, en contraste con los minerales que no contienen prácticamente nada de dichos elementos (e.g., cuarzo y feldespatos) (Fig. 1).

5) Cuarzo, feldespatos y minerales accesorios tienen tan bajo contenido en este elemento que no queda reflejado en las imágenes obtenidas por ATI. Sólo en el caso de fuerte alteración de los feldespatos (sericitización) se obtiene una imagen intensa en las ATI. Esto está en desacuerdo con los trabajos de Shearer y Papike (1986), que sugieren un contenido razonable en boro de los feldespatos. Sin embargo, en nuestros experimentos se ha observado que estos minerales no producen ninguna imagen en el detector, a no ser que estén sericitizados en parte (Fig. 1). Hervig y Peacock (1989) observan un valor de ≈ 20 ppm de Li y ≈ 1.5 ppm de B en cuarzos. Al igual que los feldespatos, el cuarzo de las muestras del CAPN estudiadas en este trabajo no dan ningún tipo de imagen que indique algún contenido en estos elementos. No obstante, hay que tener en cuenta que los autores citados presentan un estudio sobre cuarzos en una zona milonítica, por lo que fluidos hidrotermales pueden estar asociados al enriquecimiento en determinados elementos traza de los cuarzos deformados.

6) En zonas de cizalla que afectan a la migmatitas se produce una acumulación de minerales micáceos, con gran concentración de cristales de sillimanita, que actualmente están completamente sericitizados y cordierita to-

talmente pinitizada. Son dichos minerales micáceos los que generan las zonas más sensibles en las imágenes ATI (Pereira y Shaw, en preparación). Este detalle es importante a la hora de justificar el comportamiento del boro cuando la roca sufre un aumento de temperatura y de deshidratación (Moran *et al.*, 1992), de manera que este elemento, que estaría acumulado en micas con mayor preferencia, sustituyendo al Al^{IV}, sería lixiviado junto con los fluidos generados por el proceso metamórfico.

Las rocas que han sufrido una fusión parcial, como es el caso de las restitas de la Peña Negra (Bea y Pereira, 1990; Pereira, 1992; Pereira *et al.*, en preparación) deberían estar empobrecidas en boro y los productos, tales como las granodioritas y los leucogranitos, estarían enriquecidos (Shaw *et al.*, 1988). Sin embargo, este no es el caso que se observa en las rocas del CAPN, que en general tienen muy bajo contenido en boro (Pereira y Shaw, en preparación). Esta anomalía puede ser explicada en el caso de que el boro permaneciese acumulado en una fase fluida durante la anatexia y posteriormente se hubiese perdido en un proceso de lixiviación a través de fracturas y zonas de cizalla. Actualmente se están llevando a cabo experimentos que puedan apoyar o no esta teoría (Pereira y Shaw, en preparación). Además, el enriquecimiento en boro en las restitas del CAPN (Tabla 1) tiene que ser debido a la mineralogía de estas rocas, que en ocasiones está formada casi exclusivamente por sillimanita (Bea y Pereira, 1990; Pereira, 1992; Pereira *et al.*, en preparación), siendo ésta la portadora exclusiva de este elemento en este litotipo.

Conclusiones

El estudio de la distribución del Boro y el Litio en los minerales que constituyen los principales materiales del Complejo Anatéctico de la Peña Negra, realizado a partir de imágenes producidas por partículas radiactivas α (ATI), da lugar a las siguientes conclusiones:

1) La técnica ATI puede ser una excelente ayuda petrográfica al realizar un análisis modal de una determinada roca. A partir de las imágenes obtenidas se puede hacer una justificación del contenido en boro y litio de la roca total.

2) Las interferencias entre las imágenes producidas por la concentración de Li y de B en los diferentes minerales hacen que esta técnica no sea lo suficientemente satisfactoria por sí sola a la hora de hacer un análisis del comportamiento de estos dos elementos. El que se produzca una imagen ATI más intensa en los aluminosilicatos fue indicativo en principio de que el boro tuviese una inclinación preferente a acumularse en estos minerales; finalmente se ha visto que son la sillimanita y la moscovita los minerales portadores de este elemento y la imagen que se observa en el detector para los otros componentes, sobre todo para la cordierita, es la producida por el contenido en Li.

3) Sillimanita, moscovita y sericita son los minerales que en este tipo de rocas pueden llegar a contener cantidades significativas de B, con lo que cualquier reacción mineral que consuma dichas fases dará lugar a un enriquecimiento en este elemento de los fluidos metamórficos.

4) La cordierita origina también una intensa imagen ATI, pero en este caso es producida por el alto contenido en Li de este mineral.

5) Feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo son los minerales esenciales con menor contenido en boro y litio. Sólo cuando los feldespatos presentan algún grado de sericitización se observa una imagen ATI clara, debido al contenido en ambos elementos de la sericita.

6) El boro se concentra principalmente como respuesta a alteraciones postmagmáticas y no incorporado en los minerales durante la cristalización magmática. Por esto, la mayor concentración de este elemento, reflejada en ATI, aparece asociada a estructuras de deformación (e.g., cizallas con posible acumulación de fluidos y minerales arcillosos) como parte de un proceso de lixiviación.

Los autores quieren expresar su agradecimiento a A. Pidruzny, J. Avelar y P. Smith, que fueron de gran ayuda en la irradiación de las muestras y obtención de las imágenes α -track en el Reactor Nuclear de McMaster University; a J. Whorwood, que se encargó del trabajo fotográfico; y a F. Bea, que suministró los datos obtenidos por LA-ICP-MS. L.G. Corretgé, A. Marcos y un revisor anónimo aportaron las sugerencias necesarias para mejorar este trabajo. Hemos contado con el apoyo económico de los proyectos AMB93-0535 de la CICYT y del NSERC del gobierno canadiense.

Bibliografía

- Armbruster, T. y Irouschek, A. (1983): Cordierites from the Lepontine Alps: Na + boro \rightarrow Al substitution, gas content, cell parameters and optics. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 82: 389-396.
- Bea, F. y Pereira, M.D. (1990): Estudio petrológico del Complejo Anatéctico de la Peña Negra, Batolito de Avila. *Rev. Soc. Geol. España*, 3: 87-104.
- Bea, F., Pereira, M.D. y Stroh, A. (1994): Mineral/Leucosome trace element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation-ICP-MS study): constraints on melt-producing reactions and chemical fractionation during crustal anatexis. *Chemical Geology* (in press).
- Bebout, A.E., Graham, C.M., Leeman, W.P. y Sisson, V.B. (1992): Trace element distribution and mobility during prograde metamorphism of sediments: ion-microprobe study of the Pelona Schist, California. *EOS*, 73: 327.
- Chaussidon, M. y Libourel, G. (1993): Boron partitioning in the upper mantle: An experimental and ion probe study. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57: 5053-5062.
- Chorlton, L.B. y Martin, R.F. (1978): The effect of Boron on the granite solidus. *Can. Mineral.* 16: 239-244.
- Fleischer, R.L., Price, P.B. y Walker, R.M. (1975): *Nuclear tracks in solids*, p. 509-514. University of California Press.
- Grew, E.S. y Hinthorne, J.R. (1983): Boron in sillimanite. *Science* 221: 547-549.
- Grew, E.S. y Rossman, G.R. (1985): Co-ordination of boron in sillimanite. *Mineral. Magazine*, 49: 132-135

- Grew, E. S., Chernosky, J.V., Werdning, G., Abraham, K., Marquez, N. y Hinthorne, J.R. (1990): Chemistry of Kornerupine and associated minerals, a wet chemical, ion microprobe and X-Ray study emphasizing Li, Be, boro and F contents. *Journal of Petrol.* 31-5: 1025-1070.
- Harder, H. (1969): Boron content of sediments as a tool in facies analysis. *Sediment. Geol.* 4: 153-175.
- Hervig, R. L. y Peacock, S. M. (1989): Implications of trace element zoning in deformed quartz from the Santa Catalina mylonite zone. *Journal of Geology*, 89: 343-350.
- Higgins, M.D., Truscott, M.G., Shaw, D.M., Bergeron, M., Buffet, G.H., Copley, J.R.D., y Prestwick, W.V. (1984): Prompt-Gamma Neutron Activation Analysis at McMaster Nuclear Reactor. *Atomkern-energie Kerntechnik*, 44, 690-697.
- Holtz, F., Dingwell, D.B. y Behrens, H. (1993): Effects of F, B₂O₃ and P₂O₅ on the solubility of water in haplogranite melts compared to natural silicate melts, *Contrib. Mineral. Petrol.* 113: 492-501.
- Jones, A.P. y Smith, J.V. (1984): Ion probe analysis of H, Li, B, F and Ba in micas, with additional data for metamorphic amphibole, scapolite and pyroxene. *N. Jb. Miner. Mh.* 5: 228-240.
- Kerrick, D. M. (1990): The Al₂SiO₅ polymorphs. *Reviews in Mineralogy*, 22, 406 p.
- London, D., Hervig, R.L. y Morgan, GB VI (1987): Melt-vapor solubilities and elemental partitioning in peraluminous granite-pegmatite systems: experimental results with Macusani glass at 200 MPa. *Contrib. Mineral. Petrol.* 99:360-373.
- London, D., Loomis, J.L., Huang, W. y Morgan GB VI (1990): Behavior and effects of phosphorus in the system Ab-Or-Qz-H₂O at 200 MPa (H₂O). *GSA Abstracts with Prog.* 302.
- Manning, D.A.C. (1981): The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kbar. *Contrib. Mineral. Petrol.* 76:257-262.
- Malinko, S.V., Berman, J.B., Lisitsyn, A.Y. y Stoliarova, A.N. (1979): Boron in rock forming minerals based on data from a local radiographic analysis. *International Geological Review*, 21: 1274-1284.
- Moran, A.E., Sisson, V.B. y Leeman, W.P. (1992): Boron depletion during progressive metamorphism: Implications for subduction processes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 111: 331-349.
- Pearson, G.R. and Shaw, D.M. (1960): Trace elements in kyanite, sillimanite and andalusite. *Am. Mineral.* 45: 808-817.
- Pereira, M.D. (1989): *Migmatización diatexítica y la génesis de las granodioritas subautóctonas del Complejo Anatectico de la Peña Negra, Batolito de Avila*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Salamanca: 86 p.
- Pereira, M.D. (1992): *El complejo Anatectico de la Peña Negra (Batolito de Avila): un estudio de la anatexia cortical en condiciones de baja presión*. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca: 355 p.
- Pereira, M.D. y Bea, F. (1994): Cordierite-producing reactions at the Peña Negra Complex, Avila Batholith, central Spain: The key role of cordierite in low-pressure anatexis. *Canadian Mineral* 32-4 (in press).
- Pichavant, M. (1981): An experimental study of the effect of Boron on a water saturated haplogranite at 1 kbar vapour pressure, *Contrib. Mineral. Petrol.* 76: 430-439.
- Pichavant, M. (1987): Effects of B and H₂O on liquidus phase relations in the haplogranite system at 1 kbar. *Am. Mineral.* 72: 1056-1070.
- Roedder, E. (1984): Fluid inclusions, *Reviews in Mineralogy*, 12 Ed.: P.H. Ribbe, Mineral. Soc. of America, Virginia.
- Sauerer, A., Troll, G. y Matthies, D. (1989): Microdistribution of boron: particle-track images from samples of a Caledonian igneous complex. *Terra Nova*, 1: 359-364.
- Shaw, D.M. y Smith, P.L.C. (1991): Concentrations of B, Sm, Gd and H in 24 reference materials. *Geostandards Newsletter* 15-1: 59-66.
- Shaw, D.M., Truscott, M.G., Gray, E.A. y Middleton, T.A. (1988): Boron and lithium in high-grade rocks and minerals from the Wawa-Kapuskasing region, Ontario, *Can. J. Earth Sci.* 25: 1485-1502.
- Shearer, C.K. y Papike, J.J. (1986): Distribution of boron in the Tip Top pegmatite, Blak Hills, South Dakota. *Geology*, 14: 119-123.
- Shearer, C.K., Papike, J.J., Simon, S.B., Lail, J.C. y Christian, R.P. (1984) Pegmatite/wallrock interactions, Black Hills, South Dakota: Progressive boron metasomatism adjacent to the Tip Top pegmatite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 2563-2579.
- Truscott, M.G. (1980): *Lithium analysis by nuclear track methods*. McMaster Univ. Geol. Tech. Memo 80-8.
- Truscott, M.G. y Shaw, D.M. (1984): Boron in chert and Precambrian siliceous iron formations, *Geochim. Cosmochim. Acta* 48: 2313-2320.

Manuscrito recibido el 21 de Marzo de 1994.

Aceptado el manuscrito revisado el 18 de Julio de 1994.